

2006/07/26

(11)特許出願公開番号

(43)公開日 平成5年(1993)11月19日

審査請求 未請求 請求項の数 7 (全 29 頁)

(74)代理人 弁理士 吉田 豊 (外1名)

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 複数本の脚部を備える脚式移動ロボットの歩行制御装置において、

a. ロボットの上体の実傾斜角度及び／又は実傾斜角速度を検出する手段、

b. 検出値を指令値と比較し、その偏差を求める手段、を備え、前記歩行制御装置は、求めた偏差に応じて、それを解消する様に前記複数本の脚部のうちの少なくともいずれかの脚部の関節を駆動する様に構成したことを特徴とする脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項2】 前記歩行制御装置は、前記複数本の脚部のうち、第1の脚部の先端を一方向に駆動するか、第2の脚部の先端を逆方向に駆動するか、あるいは第1の脚部の先端を一方向に駆動すると共に、第2の脚部の先端を逆方向に駆動する様に構成したことを特徴とする請求項1項記載の脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項3】 前記駆動が重力方向に対する駆動である様に構成したことを特徴とする請求項2項記載の脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項4】 前記第1と第2の脚部の先端の床に対する相対位置を変えずに、仮想的に床を傾けたときの姿勢をとらせる様に構成したことを特徴とする請求項2項記載の脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項5】 床を傾けたときの回転中心を目標とするZMP位置とする様に構成したことを特徴とする請求項4項記載の脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項6】 前記ZMPを目標値に一致させるために駆動する関節と、実傾斜角度及び／又は実傾斜角速度と指令値との偏差を解消するために駆動する関節が同一である様に構成したことを特徴とする請求項1項ないし5項のいずれかに記載の脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【請求項7】 前記検出手段に、検出値を減衰させるフィルタを接続する様に構成したことを特徴とする請求項1項ないし6項のいずれかに記載の脚式移動ロボットの歩行制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 この発明は脚式移動ロボットの歩行制御装置に関し、より具体的には予期しない凹凸があっても安定に歩行できる様にしたものに關する。

【0002】

【従来の技術】 脚式移動ロボットとしては例えば、特開昭62-97006号公報記載の2足歩行のものが知られている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 脚式移動ロボット、特に2足歩行の脚式移動ロボットにおいて、関節を変位制御で駆動する場合、歩行中の両脚支持期に姿勢が少しでも前に傾くと、後側の足平が床面から離れて全荷重が前

2

側の足平に乗るため、後方に戻そうとする極めて大きな復元力が発生する。即ち、姿勢の単位角当たりの復元力を復元力係数と呼ぶことにすると、両脚支持期では姿勢の安定化制御を何等行っていないとしても、極めて大きな復元力係数を持つことになる。従って、この様な状態でさらに上体の傾き（あるいは重心のずれ）を両脚の動きにフィードバックする様な姿勢安定化制御を加えると、復元力係数がさらに大きくなり、復元力係数に見合った十分なダンピングを与えることができなくなる。この結果、かえって姿勢を不安定にしてしまう。ところで、関節をトルク制御で動かす場合にも脚に適宜なコンプライアンスを与えることができるが、ロボットと床との相対位置に対応するコンプライアンス特性が姿勢によって大きく変化するため、床の凹凸・傾斜などに対する外乱抑制特性が一致しない。

【0004】 従って、この発明の第1の目的は、関節部の摩擦や慣性の影響によって実用化が困難な関節トルク制御を導入することなく、姿勢復元係数を一定に保たせることによって、ロボットを常にある一定の復元力を持った倒立振子に近似することができ、制御系を線形近似することができて姿勢安定化制御則を容易に設計することができる様にした、脚式移動ロボットの歩行制御装置を提供することにある。

【0005】 更には、予期しない凹凸・傾斜があっても、その影響を大きく受けることなく、鉛直方向に対する上体の傾きが、ほぼ設計値通りに維持されたまま歩行することができる様にした脚式移動ロボットの歩行制御装置を提供することにある。

【0006】 更には、この様な脚式移動ロボットにおいては、床から受ける反力とロボット側から床に作用する重力と慣性力との合力とをバランスさせて歩行することになるが、その着地時の衝撃力が大きいと、姿勢を崩す一因となり、安定した歩行を期待することができない。

【0007】 従って、この発明の第3の目的は、ロボットが受ける着地衝撃を可能な限り低減して安定した姿勢で歩行することができる様にした脚式移動ロボットの歩行制御装置を提供することにある。

【0008】

【課題を解決するための手段】 上記した課題を解決するためにこの発明は例えば請求項1項に示す如く、複数本の脚部を備える脚式移動ロボットの歩行制御装置において、ロボットの上体の実傾斜角度及び／又は実傾斜角速度を検出する手段、検出値と指令値とを比較し、その偏差を求める手段、を備え、前記歩行制御装置は、求めた偏差に応じて、その偏差を解消する様に、前記複数本の脚部の少なくともいずれかの脚部の関節を駆動する様に構成した。

【0009】

【作用】 上体の傾斜角度及び／又は角速度が指令値に一致する様に脚部を駆動することから、ロボットの復元力

を一定にする、即ち、ロボットを常にある一定の復元力をもった倒立振子で近似することができて、線形な制御特性を得ることができる。その結果、この安定化制御のみならず、他の種の安定化制御をも容易に採り入れることができる。また常に設計値通りの姿勢を保持することができると共に、着地衝撃も効果的に減少することができる。

【0010】

【実施例】以下、脚式移動ロボットとして2足歩行のロボットを例にとってこの発明の実施例を説明する。図1はそのロボット1を全体的に示す説明スケルトン図であり、左右それぞれの脚部リンク2に6個の関節を備える（理解の便宜のために各関節をそれを駆動する電動モータで示す）。該6個の関節は上から順に、腰の脚部回転用の関節10R、10L（右側をR、左側をLとする。以下同じ）、腰のロール方向（x軸まわり）の関節12R、12L、同ピッチ方向（y軸まわり）の関節14R、14L、膝部のピッチ方向の関節16R、16L、足首部のピッチ方向の関節18R、18L、同ロール方向の関節20R、20Lとなっており、その下部には足平22R、22Lが装着されると共に、最上位には上体（筐体）24が設けられ、その内部には制御ユニット26が格納される。

【0011】上記において腰関節は関節10R（L）、12R（L）、14R（L）から構成され、また足関節は、関節18R（L）、20R（L）から構成される。また、腰関節と膝関節との間は大腿リンク32R、32Lで、膝関節と足関節との間は大腿リンク34R、34Lで連結される。ここで、脚部リンク2は左右の足についてそれぞれ6つの自由度を与えられ、歩行中にこれらの $6 \times 2 = 12$ 個の関節（軸）をそれぞれ適宜な角度に駆動することで、足全体に所望の動きを与えることができ、任意に3次元空間を歩行することができる様に構成される。先に述べた様に、上記した関節は電動モータからなり、更にはその出力を倍力する減速機などを備えるが、その詳細は先に本出願人が提案した出願（特願平1-324218号、特開平3-184782号）などに述べられており、それ自体はこの発明の要旨とするところではないので、これ以上の説明は省略する。

【0012】図1に示すロボット1において、足首部には公知の6軸力センサ36が設けられ、足平を介してロボットに伝達されるx、y、z方向の力成分 F_x 、 F_y 、 F_z とその方向まわりのモーメント成分 M_x 、 M_y 、 M_z とを測定し、足部の着地の有無と支持脚に加わる力の大きさと方向とを検出する。また足平22R（L）の四隅には静電容量型の接地スイッチ38（図1で図示省略）が設けられて、足平の接地の有無を検出する。更に、上体24には傾斜センサ40が設置され、x-z平面内のz軸に対する傾きとその角速度、同様にy-z平面内のz軸に対する傾きとその角速度を検出す

る。また各関節の電動モータには、その回転量を検出するロータリエンコーダが設けられる。更に、図1では省略するが、ロボット1の適宜な位置には傾斜センサ40の出力を補正するための原点スイッチ42と、フェール対策用のリミットスイッチ44が設けられる。これらの出力は前記した上体24内の制御ユニット26に送られる。

【0013】図2は制御ユニット26の詳細を示すブロック図であり、マイクロ・コンピュータから構成される。そこにおいて傾斜センサ40などの出力はA/D変換器50でデジタル値に変換され、その出力はバス52を介してRAM54に送られる。また各電動モータに隣接して配置されるエンコーダの出力はカウンタ56を介してRAM54内に入力されると共に、接地スイッチ38などの出力は波形整形回路58を経て同様にRAM54内に格納される。制御ユニット内にはCPUからなる第1、第2の演算装置60、62が設けられており、第1の演算装置60は後述の如くROM64に格納されている腰の姿勢の軌跡の特徴などを表すパラメータを読みだして基準歩容を生成し、次いでそれから目標関節角度（関節駆動パターン）を算出してRAM54に送出する。また第2の演算装置62は後述の如くRAM54からその目標値と検出された実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な制御値を算出してD/A変換器66とサーボアンプを介して各関節を駆動する電動モータに出力する。

【0014】続いて、この制御装置の動作を説明する。

【0015】図3はその動作を示す構造化フロー・チャート（PAD図）である。同図を参照して説明すると、先ずS10において腰の位置を表すパラメータから腰の姿勢（即ち、腰の傾きと向き）を算出する。次いでS12においてZMP軌道の特徴を表すパラメータから運動方程式により導かれるZMP目標位置を算出する（ZMP軌道が折れ線表現で表されているときは、特徴を表すパラメータも折点座標で与えられる。尚、ここで「ZMP」は、床反力によるモーメントが零となる床面上の点を意味する）。次いでS14において足平軌道の特徴を表すパラメータ、例えば着地位置、片脚支持期時間から両足平の位置、姿勢を算出し、次いでS16において腰の高さを求め、S18において腰の水平加速度、水平位置を求める。この様に、S10からS18は基準歩容を作成する作業を示しており、この実施例の場合には前述の如く、腰の姿勢の軌跡の特徴などを表すパラメータが一步ごとのデータとして予め設定されており、それから腰、ZMP、足平の位置・姿勢などの軌道を算出して基準歩容とする。尚、後で述べる如く、この基準歩容から各関節の目標角度が具体的に算出される。

【0016】次いで、S20に進んで脚コンプライアンス制御値の演算を行う。図4はその作業を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

5

【0017】図4に従って説明を開始する前に、図5を参照してこの実施例で言うコンプライアンスについて説明する。

【0018】先にも述べた様に、ロボットから床に作用する力（ロボットの重力と慣性力の合力）と床からロボットに作用する床反力とが釣り合っていれば、ロボットは安定に歩行する。これを集中荷重系におきかえて説明すると、ZMP実測位置（実測床反力の中心点）が前記したZMP目標位置（設計値で想定した床反力の中心点）に一致していれば、ロボットは設計値通りの姿勢を保って歩行する。従って、この発明においては最初の実施例において、両脚に取りつけた6軸力センサ36から、後側の足にかかる床反力と前側の足にかかる床反力を測定し、これらの合力である総合の実測床反力を求め、その作用点であるZMP実測位置を求めてZMP目標位置と比較する。そして、図6に示す様に、ZMP実測位置が前側にずれていたら（この場合、ZMP目標位置のまわりに図示の如くモーメントが生じてロボットを後傾させる）、そのずれ量に応じて前側の足平を垂直に持ち上げる（あるいは、そのずれ量に応じて後側の足平を垂直に下げるか、前側の足平を垂直に持ち上げつつ後側の足平を垂直に下げる）。この動作により、前側の足にかかる床反力が、後側の足にかかる床反力に比べて相対的に減少するので、ZMP実測位置は後退してZMP目標位置に近づく。かかる制御をこの明細書では『脚コンプライアンス制御』と呼ぶ。即ち、この明細書では脚コンプライアンス制御は、ZMP目標位置とZMP実測位置とのずれを解消する制御を意味する。あるいは、ZMP目標位置まわりに発生したモーメントを解消する制御と言うこともできる。

【0019】即ち、動力学計算に基づく理想的な歩容に従ってロボットを歩行させるとき、両脚支持期に予期せぬ凹凸に遭遇するなどしてロボットがわずかに前傾したとする。この明細書で言う脚コンプライアンス制御を行わないとすると、ロボットは後側の足平が浮き上がり、全荷重が前側の足にかかり、その結果、床反力作用点（ZMP実測位置）は、前側の足裏に移る。つまり、ロボットの傾斜に対してほとんど2値的にZMPが変化する（図7）。これに対し、脚コンプライアンス制御を行った場合には、実測床反力中心（ZMP実測位置）が設計床反力中心（ZMP目標位置）よりも前にずれたとき、前側の足平を持ち上げることににより、上体が前傾したまま両脚が接地した姿勢になる。このときのZMP実測位置とZMP目標位置のずれは足平の持ち上げ高さに比例し、足平の持ち上げ高さは上体の傾斜角に比例するので、ZMP実測位置とZMP目標位置のずれと、上体の傾斜角も比例する。尚、後で述べる様に、比例勾配は脚コンプライアンスの大きさに反比例し、脚コンプライアンスの量が大きいほどロボットの傾斜角に対する比例領域が拡大する（図8）。

6

【0020】尚、この脚コンプライアンス制御は両脚支持期に限って行うものではなく、片脚支持期にも行って良い。また、脚コンプライアンス制御の発振を防ぎ、かつ荷重変動の高周波成分を機械的に吸収させるため、図9に示す様に、足関節18、20R（L）下部にばねやゴムなどの衝撃吸収機構を挿入しておくのが望ましい。

【0021】以上を前提として図4を参照して脚コンプライアンス制御値の演算について説明すると、まずS100で6軸力センサ36の検出値を取り込む。次いで、S102においてZMP実測位置を求める。図10を参照してその手法を説明すると、任意の原点まわりのモーメント $M \rightarrow$ を求め、次いで力 $F \rightarrow$ を求め、次いで $M \rightarrow = F \rightarrow \times L \rightarrow$ となる距離ベクトル $L \rightarrow$ を求めて、その距離 L だけ平行移動させて床との交点を求めて終わる。

【0022】次いで、S104に進んでZMP実測位置とZMP目標位置とを比較し、ずれ方向、即ち、ZMP実測位置がZMP目標位置よりずれているときは、前側にずれているか、後側にずれているかを判別すると共に、その差（ずれ量） x を距離で算出する。続いてS106に進んで算出された差 x に所定のゲイン K_f と実測床反力 F （ないしはその上下方向（ z 方向）成分 F_z ）を乗じて足平の姿勢補正量を求める（床反力に乗じない手法でも良い）。即ち、先に述べた様に、ZMP実測位置がZMP目標位置より前にずれていれば、図6に示す様に設計床反力中心（ZMP目標位置）まわりに発生したモーメントがロボットを後傾させるが、前側の足の足平を垂直に上げるか、後側の足の足平を垂直に下げるか、あるいは前側の足の足平を垂直に上げると共に、後側の足平を垂直に下げる様に足平の姿勢補正量を求めてS108で姿勢補正量に応じて足平の位置補正を行うことにより、逆方向のモーメントを生じさせる、即ち、ZMP実測位置をZMP目標位置に近づけることができ、姿勢のバランスを回復させることができ、ロボットを設計値通りの姿勢で歩行させることができる。尚、このとき姿勢修正量（足平の持ち上げ高さ）は図8に示す様に、ずれ量 x に応じて決定され、ずれ量 x は上体の傾斜角に比例することから姿勢修正量は上体の傾斜角に比例する。即ち、ロボットの姿勢復元力と上体の傾斜角との比をロボットの姿勢復元力係数とすると、上体の傾斜角に応じて姿勢修正量を決定することにより、ロボットの姿勢復元力係数を可能な限り一定の値とすることができる。即ち、ロボットを常にある一定の復元力係数を持った倒立振子で近似することができ、線形な制御特性を得ることができる。尚、姿勢の修正方向は、実測ZMPが設計ZMPより後側にずれてロボットに前方向のモーメントが作用しているときは足平の駆動方向を逆にし、後側の足の足平を上げるか、前側の足の足平を下げるか、ないしはその両方を行う様に足平の姿勢補正量を求めることになる。

【0023】再び図3フロー・チャートに戻り、続いて

S22に進んで足平の位置・姿勢と腰の位置・姿勢とから全12個の関節についてその目標角度を求める。尚、S20の脚コンプライアンス制御値演算において図4フロー・チャートによって足平の姿勢が補正されたときは、補正された姿勢に基づいて目標角度を求める。続いてS24に進んで前記した傾斜センサ40の出力からロボットの傾きを検出し、傾いているときは姿勢を回復する様に目標姿勢を修正する。尚、この修正はこの制御とは直接関係を有しないので、詳細な説明は省略する。続いてS26に進んで関節を目標角度に追従制御する。これは、図2に示した第2の演算装置62において制御するものであるが、この制御もこの発明の要旨には関係しないので、詳細な説明は省略する。

【0024】この実施例は上記の如く構成したので、床に予期しない凹凸があってZMP実測位置がZMP目標位置からずれることがあっても、その差を効果的に解消し、ZMP目標位置まわりにロボットを転倒させようとするモーメントが生じて、それを打ち消す様に構成した。即ち、ロボットを常に一定の復元力を持った倒立振子で近似することができる様にしたので、制御特性を線形にすることができて制御系の設計が容易となり、他の姿勢安定化制御などの組み合わせが容易となると共に、床に予期しない凹凸があっても安定して歩行することができる。またZMP実測位置をZMP目標位置に一致させる様に制御することから、着地衝撃も低減する（ここで着地衝撃は、床反力のうちの大きなものと言う）。

【0025】図11はこの発明の第2の実施例を示す、図4と同様の脚コンプライアンス制御値演算サブルーチン・フロー・チャートである。第1実施例と相違する点に焦点をおいて説明すると、ずれ方向とずれ量 x を求めた後（S200～S204）、S206に進んで図6末尾に示す様に、床と足平の関係を一定に保ったまま床を傾斜させたときと仮想したときの座標回転角を図示の如く求め、S208に進んで両足平の位置・姿勢をZMP目標位置まわりに上記回転角だけ回転させる様に、姿勢を修正する。ここで、床の傾斜角 θ は、 $\theta = \text{ずれ量} x \cdot \text{ゲイン} K_f$ 、で決定する。

【0026】この実施例の場合、図6末尾に示す様に実測ZMP位置が前にずれている場合には、後側の足平が実際の床（実線で示す）を強く蹴ることとなって床反力を生じさせ、ZMP実測位置をZMP目標位置に近づけることができる。即ち、この場合も図6上部に示したモーメントと逆方向のモーメントを生じさせることができ、姿勢の崩れを防ぐことができる。また、この実施例においても、ずれ量に比例した復元力を与えることができる。即ち、復元力係数を一定にして線形な制御特性を得ることができる。

【0027】図12はこの発明の第3実施例を示す、先の図3と同様のフロー・チャートである。第1実施例

（ないしは第2実施例）と相違する点に焦点をおいて説明すると、この実施例においてはS300～S306で脚コンプライアンス制御値を演算した後、S308に進んで無理な姿勢にならない腰の上下方向（ z 方向）高さを求め、次いでS310に進んで脚コンプライアンス制御を行って足平位置・姿勢を修正してもZMPが目標位置になる様に、腰の水平加速度と水平位置とを求め、S312に進んで足平位置・姿勢および腰の位置・姿勢

（S306のサブルーチンにおいて修正されたときはその修正値）に基づいて目標関節角度を求める。尚、以後のS314、S316を含む残余の構成は第1実施例（ないしは第2実施例）と異なる。

【0028】即ち、脚コンプライアンス制御は、床の凹凸や傾斜などによる外乱があっても、ZMP実測位置がZMP目標位置からずれない様にすることが主目的であるので、脚コンプライアンス制御を行ってもZMP目標位置自体は、ずれないことが望ましい。即ち、脚コンプライアンス制御によって足平の姿勢を修正するのみでZMP実測位置をZMP目標位置に戻すことができるが、その結果、上体の姿勢が変化してZMP目標位置自体が所期の位置からずれることも起こり得る。ここで、脚の質量、特に先端の質量が上体に比べて十分に小さければ、設計ZMP位置のずれは無視することができるので、上体の水平位置は基準歩容のままで良い。図1に示した構成において足平22の質量は上体24に比して十分に小さいとは言いが、第1実施例（ないしは第2実施例）の場合には脚コンプライアンス制御を行うことによる上体への影響は実質的には非常に小さいと考えて、無視した。それに対して第3実施例では図示した如く、上体の水平方向の位置、加速度を修正したものである。よって、第1実施例（ないしは第2実施例）の効果に加えて、姿勢安定化を一層精緻に行うことができる効果を有する。尚、第3実施例において、S308の腰の上下方向高さの修正は行わなくても良い。

【0029】尚、脚コンプライアンス動作が小さければ、脚コンプライアンス制御値演算サブルーチンを歩容生成ブロック線図2の途中またはその後に移しても良い。そうするときは、歩容生成部1と歩容生成部2の演算を予めオフラインで行っておくことができるので、演算能力の低いコンピュータを用いるとき好都合である。

【0030】図13はこの発明の第4実施例を示す、先の図4（第1実施例）、図11（第2実施例）と同様な、脚コンプライアンス制御値演算に関するサブルーチン・フロー・チャートである。同図を参照して説明すると、S400において6軸力センサ検出値を取り込んだ後、S402に進んでZMP目標位置まわりに実際に発生しているモーメントを求め、S404に進んで実モーメントとモーメント指令値（通常は零に設定）との差を求め、S406、S408に進んで第2実施例と同様に偏差にゲインを乗じて座標回転角を求め、それに応じて

両足平の位置・姿勢修正量を求める様にした。

【0031】第4実施例は実測の床反力の分解のしかたにおいて従前の実施例と異なる。即ち、従前の実施例においてはモーメントなしの力だけのベクトルで床反力を分解したときの作用点位置に着目したのに対し、第4実施例においてはZMP目標位置にかかる値を力とモーメントに分解したときのモーメントに着目したものであり、その意味では従前の検出手法と本質的には相違ない。

【0032】尚、第4実施例において図13サブルーチン・フロー・チャートに従って脚コンプライアンス制御値を演算した後、目標関節角度を算出することになるが、その際には第1実施例の図3に示す様に上体の位置・姿勢を修正しない様にしても良く、あるいは第3実施例の図12に示す様に上体の水平方向の位置・加速度を修正しても良い。第4実施例の効果としてはZMP目標位置まわりにモーメントを直接的に検出して脚コンプライアンス制御値を決定することから、従前の実施例に比して一層線形で安定した姿勢制御を実現することができる。

* 20

$$G = \frac{1}{1 / K l e g + K f}$$

【0035】これは、図15に示す如く、バネ定数 $1/(1/K l e g + K f)$ の曲げバネと等価である。

【0036】この第4実施例においては、ロボットが予想しない凹凸を踏むなどして目標ZMP位置まわりにモーメントが生じたとき、それを直接的に検出してそのモーメントの大きさに比例する座標回転角を仮想的に求め、その仮想的な角度だけ足平の位置・姿勢を目標ZMP位置まわりに回転させる様に修正する、即ち、目標ZMP位置まわりに生ずるモーメントを直接的に検出し、それを打ち消す様に同一位置まわりに逆方向のモーメントを生じさせる様にしたので、第1ないし第3実施例の場合に比して、前にも述べた如く、一層制御特性の線形化と姿勢の安定化制御を実現することができる。更に、上体についても図12に示したと同様に水平方向の位置・加速度を修正するときは、なお一層的確に制御特性の線形化と姿勢の安定化を図ることができる。

【0037】尚、ZMP目標位置は連続的にまたは断続的に移動することから、急激にZMP目標位置が移動する歩容に対しては、モーメント計算中心や脚コンプライアンス動作の回転中心をZMP目標位置にとると、急激な挙動変化が発生しやすくなって、跳ねるなどして安定して歩行することができなくなる恐れがある。従って、この様な歩容に対してはモーメント計算中心や脚コンプライアンス動作の回転中心を、ZMP目標位置に近いが、それよりも穏やかに移動する点、例えばZMP目標位置にフィルタをかけてスムージングした点においても良い。

*【0033】この第4実施例を図14のブロック線図に基づいて平地歩容について説明する（基準歩容が勾配 θ_1 の斜面の歩容なら、下記説明において $\Delta\theta$ および $\Delta\theta_{comm}$ を $\theta_1 + \Delta\theta$ および $\theta_1 + \Delta\theta_{comm}$ に置き換えれば良い）。図において、設定された位置・姿勢から各関節の変位を求める、いわゆる逆キネマティクス演算部では、基準歩容において床を $\Delta\theta_{comm}$ 傾けたときの姿勢を計算する。変位コントローラによって、図1に示したロボットの関節変位が、逆キネマティクス演算部から出される姿勢指令に追従する。図1に示したロボットを完全剛体であると想定し、実関節変位から得られる姿勢にいて、ロボットと足平接地面接線（図中のAAダッシュ線）とがなす相対角度を $\Delta\theta$ とする。変位コントローラの追従性が十分高ければ、 $\Delta\theta$ は $\Delta\theta_{comm}$ に一致する。このとき、ロボットと床の相対角度から、ZMP目標位置まわりの床反力実モーメントMまでの伝達関数Gは、数1に示す様になる。

【0034】

【数1】

【0038】図16はこの発明の第5実施例を示す、第4実施例の図13と同様の脚コンプライアンス制御値演算サブルーチン・フロー・チャートであって、第4実施例と相違する点は、ZMP目標位置に代えて、基準点、例えば支持脚のくるぶし（図1において足関節18、20R（L）の交点）の床面への投影点まわりのモーメントを求め、その点まわりに回転させるものである（S502、S508）。他のステップを含む残余の構成は第4実施例と同様であり、上体の修正の有無も第4実施例と同様である。床反力モーメントを求めるのが若干容易となる反面、第4実施例に比して若干制御値が劣るのを除けば、効果も第4実施例と同様である。尚、基準点は移動する点であっても良い。

【0039】図17は第6実施例を示しており、従前の実施例と相違する点は、ZMP目標位置から遠い側の足平を激しく移動させると脚が発振する恐れがあることから、図18に示す様に、遠い側の足平の回転座標上の移動角度 θ_1 を、近い側の足平のそれ θ_2 に比し、小さくした。尚、足平の駆動手法を第2実施例に従ったが、第1実施例の上下動についても妥当するものであり、また上体についても修正してもしなくても良い。

【0040】図19はこの発明の第7実施例を示しており、進行方向に向かって横への転倒力がかかる場合に対処するものである。即ち、従前の実施例は進行方向、即ち、y軸まわりに作用するモーメントMyを検出して制御値を演算するものであったが、この実施例の場合、横方向（x軸まわり）のモーメントMxも検出して制御値

11

を演算する様にした(S700~S708)。尚、第2実施例に準拠して説明したが、この手法は他の実施例にも妥当する。またモーメントを用いたが、横方向の力F_yを用いても良い。

【0041】図20はこの発明の第8実施例を示しており、第4実施例に関して示した図14のブロック線図において、ロボット本体と床との間にフィルタ80を介挿したものである。例えばこのフィルタの伝達関数を1/*

$$G = \frac{1}{1/K_{leg} + K_f / (1 + TS)}$$

【0043】脚剛性K_{leg}が十分高ければ、1/K_{leg}は無視することができ、同式は数3のようになる。

【0044】

【数3】

$$G = \frac{-T}{K_f} S + \frac{-1}{K_f}$$

【0045】これは、図21に示す様に、ネジリバネとネジリダンパを並列に組んだ機構と等価である。即ち、ロボット本体と床との間にメカニカルダンパを挿入したのと等価なダンピング効果を得ることができ、遊脚が着地したときの跳びはねを防ぐことができる。また、かかるローパスフィルタをコンプライアンス制御のフィードバックループに挿入するため、副次的な効果として、高周波に対するループゲインを下げることができ、コンプライアンス制御系の安定度が高まり、発振を防ぐことができる。また6軸力センサ36から進入する高周波ノイズを除去することもできる。

【0046】図22ないし図28はこの発明の第9実施例を示す。

【0047】脚式移動ロボットにおいて、関節を変位制御で駆動する場合、上に述べた脚コンプライアンス制御を行わないとき、歩行中の両脚支持期に姿勢が少しでも前に傾くと、後側の足平が床から離れて全荷重が前側の足平に乗るため、後ろに戻そうとする極めて大きな復元力が発生する。即ち、前記した復元力係数が、両脚支持期では極めて大きくなる。従って、このような状態でさらに上体の傾きあるいは重心のずれを両脚の動きにフィードバックする姿勢安定化制御を行うと、復元力係数がさらに大きくなり、それに見合った十分なダンピング効果を与えることができなくなる。この結果、かえって姿勢を不安定にしてしまう。従って、この実施例では、上に述べた脚コンプライアンス制御を行いつつ、上体の傾きに応じて姿勢安定化制御を行う様にした。尚、上に述べた脚コンプライアンスを行う代わりに、関節をトルク制御で駆動することによっても脚にコンプライアンスを与えることができるが、ロボットと床との相対位置に対応するコンプライアンス特性は、姿勢によって大きく変化するため、床の凹凸・傾斜などに対する外乱抑制特性が

12

* (1+TS) (ただし、Tは時定数) とする。変位コンローラの追従性が十分高いとすると、ΔθはΔθ_{comm}に一致する。従って、ロボットと床との間の相対角度からZMP目標位置まわりの床反力実モーメントMまでの伝達関数Gは、数2に示す様になる。

【0042】

【数2】

一致しない。

【0048】以下、図22ないし図23フロー・チャートを参照して第9実施例を説明する。

【0049】図22は第3実施例に関して説明した図12と同様のメインルーチン・フロー・チャートであって、相違する点は、そのS810において脚コンプライアンス制御値のみならず、安定化制御値も演算する点である。図23はその演算を示すサブルーチン・フロー・チャートであり、実モーメントと指令値との差を求めた後(S900~S904)、S906において図示の如く、上体の実傾斜角度と傾斜角速度と指令値との偏差に所定のゲインを乗じて安定化制御値を求め、脚コンプライアンス制御値に合算して座標回転角を求め、S908においてその値に修正する様にした。この様に、安定化制御値と脚コンプライアンス制御値で同一の関節を対象とする様にしたことで、制御を簡易にしている。

【0050】図24はそれを示すブロック線図であり、図示の如く、PD制御を用いて上体の姿勢安定化制御を行っている。ここで、前記した様に、ΔθがΔθ_{comm}に一致し、ZMP実測位置がZMP目標位置に一致すると仮定すると、図24は図25の様に變形することができる。図25から明らかな様に、ロボットと制御系とを合わせてトータルなシステムは線形であり、従って、姿勢傾斜安定化制御には、古典制御理論、最適制御理論、ロバスト制御理論などの様々な線形制御理論を適用することができる。図26に状態フィードバック制御を用いた例を示す。

【0051】第9実施例においては上記の如く構成したことから、関節部の摩擦や慣性の影響によって実用化が困難な関節トルク制御を用いることなく、姿勢安定化制御を実現することができる。即ち、両足平の変位を設計値から故意にずらすと、脚コンプライアンス制御により、ずらし量に応じた姿勢復元力が発生する。従って、上体傾斜フィードバックによる姿勢安定化制御において、復元力を発生させるために操作量には、両足平の変位ずらし量を用いることができる。また片脚支持期、両脚支持期の如何にかかわらず、ロボットの姿勢復元力係数をほぼ一定に保たせることができるので、ロボットを常にある一定の復元力を持った倒立振子に近似すること

ができ、制御系を線形近似できて、姿勢安定化制御則を容易に設計することができる。また床に予期しない凹凸・傾斜があっても、その影響をあまり受けずに鉛直方向に対する上体の傾きが、ほぼ設計値通りに維持されたまま歩行させることができる。

【0052】ここで、図25に示すフィルタ800には後で述べる様に第8実施例で述べたと同じ構成が適用可能であるが、ここでは別の例としてフィルタの伝達特性を1にして更に検討を加える。即ち、制御系の動特性に着目するために、床反力モーメント指令を0とみなしてコンプライアンス制御をまとめると、図25は図27の様に变形することができる。図27は、図28に示すバネとアクチュエータを持つ倒立振子と等価である。この様に単純化すると、様々な線形制御理論の適用が可能となるだけでなく、単純モデルの挙動からロボットの姿勢制御を類推することができるので、応答性や各種外乱に対する抑制特性など種々な特性の最適な組み合わせが、実験やシミュレーションを多く重ねなくても、容易に見つけ出すことができる。尚、フィルタ800には図20と同じ様に、メカニカルダンパと等価なダンピング効果を与えて良いことは言うまでもない。即ち、上体の傾き角をフィードバックする姿勢制御において、図23で示した様に、安定性を高めるために上体の傾き角速度（または接地点と重心とを結ぶ直線の傾き角速度）もフィードバックするが、リンク系の剛性不足や歩容の滑らか不足などで上体が高い周波数で振動すると、傾き角速度に大きな高周波変動が発生するため、傾き角速度フィードバックゲインを大きくすると、脚が振動または発振してしまう恐れがある。そこで、第8実施例で用いたのと同じフィルタを用いると、傾き角速度フィードバックを補って姿勢制御系の安定度を高めることができるので、傾き角速度フィードバックゲインを小さめに設定しても、十分な安定性を確保することができる。尚、遊脚が着地したときの跳びはねを防止するなどの効果は第8実施例と同様である。

【0053】尚、上記実施例において種々の例を示したが、変形例はこれに止まるものではない。即ち、この制御においては、整理すると、

1. 検出対象

- a. ZMP目標位置とZMP実測位置とのずれ量
- b. ZMP目標位置まわりの床反力によって発生する力のモーメント
- c. 基準点まわりの床反力によって発生する力のモーメント

2. 足平の動作

- a. 片足の上下
- b. 両足の上下
- c. 足平の回転
- d. ZMP目標位置から遠い側の足平の動作量を他の足平のそれに対して小さくする

3. 上体の水平方向の動作

- a. 基準歩容保持
- b. 水平方向について位置、加速度を修正

4. 上体の上下方向の動作

- a. 基準歩容保持
 - b. 腰高さを再計算
- #### 5. 上体の姿勢安定化制御
- a. 行わない
 - b. 行う

10 となるが、これらは全て組み合わせ可能であり、実施例に示したのはその一例に過ぎない。

【0054】また上記において、歩行データを予め設定しておく場合に適用する例を示したが、それに限られるものではなく、歩行のときリアルタイムに求める様にした技術に適用させても良い。

【0055】また上記において、2足歩行の脚式移動ロボットを例にとって説明してきたが、それに限られるものではなく、3足以上の脚式移動ロボットにも妥当するものである。

20 【0056】

【発明の効果】請求項1項にあつては、複数本の脚部を備える脚式移動ロボットの歩行制御装置において、ロボットの上体の実傾斜角度及び／又は実傾斜角速度を検出する手段、検出値と指令値とを比較し、その偏差を求める手段、を備え、前記歩行制御装置は、求めた偏差に応じて、それを解消する様に、前記複数本の脚部のうちの少なくともいずれかの脚部の関節を駆動する様に構成したので、上体傾斜フィードバックによる姿勢安定化制御において復元力を発生させるために操作量には脚部関節の変位ずらし量を用いることができ、関節部の摩擦や慣性の影響によって実用化が困難な関節トルク制御を導入することなく、制御系を線形近似することができ、姿勢安定化制御を容易に実現することができる。また予期しない凹凸に遭遇したときも姿勢の崩れを極力抑えることができて設計値通りの姿勢を保持することができると共に、着地時の衝撃も効果的に吸収することができる。

【0057】請求項2項の装置にあつては、前記歩行制御装置は、前記複数本の脚部のうち、第1の脚部の先端を一方に駆動するか、第2の脚部の先端を逆方向に駆動するか、あるいは第1の脚部の先端を一方に駆動すると共に、第2の脚部の先端を逆方向に駆動する様に構成したので、比較的簡易な手法で前記した安定した姿勢と線形な制御特性を確保することができ、また着地衝撃も吸収することができる。

【0058】請求項3項の装置にあつては、前記駆動が重力方向に対する駆動である様に構成したので、単に脚部を重力方向に駆動するのみで、前記した効果を得ることができる。

【0059】請求項4項の装置にあつては、前記第1と第2の脚部の先端の床に対する相対位置を変えずに、仮

想的に床を傾けたときの姿勢をとらせる様に構成したので、単に仮想的に床を傾けたときの姿勢をとらせるのみで、前記した効果を得ることができる。

【0060】請求項5項の装置にあっては、床を傾けたときの回転中心を目標とするZMP位置とする様に構成したので、回転中心を検出点と一致させることができ、一層的確に前記した効果を得ることができる。

【0061】請求項6項の装置にあっては、前記ZMPを目標値に一致させるために駆動する関節と、実傾斜角度及び／又は実傾斜角速度と指令値との偏差を解消するために駆動する関節が同一である如く構成したので、制御を一層簡易にすることができる。

【0062】請求項7項の装置にあっては、前記検出手段に、その検出値を減衰させるフィルタを接続する様に構成したので、遊脚が着地したときの跳び跳ねが生じるときもそれも防止することができ、また制御系の安定度を高めてその発振を防止することができ、さらに検出手段にノイズが侵入するときも、それを良く防止することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明に係る脚式移動ロボットの歩行制御装置を全体的に示す概略図である。

【図2】図1に示す制御ユニットの説明ブロック図である。

【図3】図2に示す制御ユニットの動作を示すメイン・フロー・チャートである。

【図4】図3フロー・チャートの中の脚コンプライアンス制御値演算サブルーチンを示すフロー・チャートである。

【図5】図4の脚コンプライアンス制御を説明する説明図である。

【図6】図4の脚コンプライアンス制御を説明するもので、脚部の駆動手法を示す説明図である。

【図7】図4の脚コンプライアンス制御のZMP目標位置とZMP実測位置とのずれ量とロボットの傾斜角との関係を示すグラフ図である。

【図8】図4の脚コンプライアンス制御のZMP目標位置とZMP実測位置のずれ量と脚コンプライアンス制御値の大小の関係を示すグラフ図である。

【図9】図4の脚コンプライアンス制御に適したロボットの足部構造を示す説明図である。

【図10】図4の脚コンプライアンス制御のZMP実測位置の検出手法を示す説明図である。

【図11】この発明の第2実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図12】この発明の第3実施例を示す脚コンプライアンス制御と併せて上体位置の再修正を行う例を示すフロー・チャートである。

【図13】この発明の第4実施例を示す脚コンプライア

ンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図14】第4実施例を説明するブロック線図である。

【図15】図14に示すロボットを簡略にモデル化した説明図である。

【図16】この発明の第5実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図17】この発明の第6実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図18】第6実施例の制御を説明する説明図である。

【図19】この発明の第7実施例を示す脚コンプライアンス制御値演算の別の例を示すフロー・チャートである。

【図20】この発明の第8実施例を示す制御ループにフィルタを介挿した状態を示すブロック線図である。

【図21】図20のフィルタの特性を機械的に説明する説明図である。

【図22】この発明の第9実施例を示す脚コンプライアンス制御に別の安定化制御を組み合わせた制御を示すフロー・チャートである。

【図23】図22フロー・チャートの脚コンプライアンス制御と安定化制御の制御値演算サブルーチンを示すフロー・チャートである。

【図24】第9実施例を説明するブロック線図である。

【図25】図24のブロック線図を簡略的に変形して示すブロック線図である。

【図26】第9実施例を状態フィードバック制御手法で実現した例を示すブロック線図である。

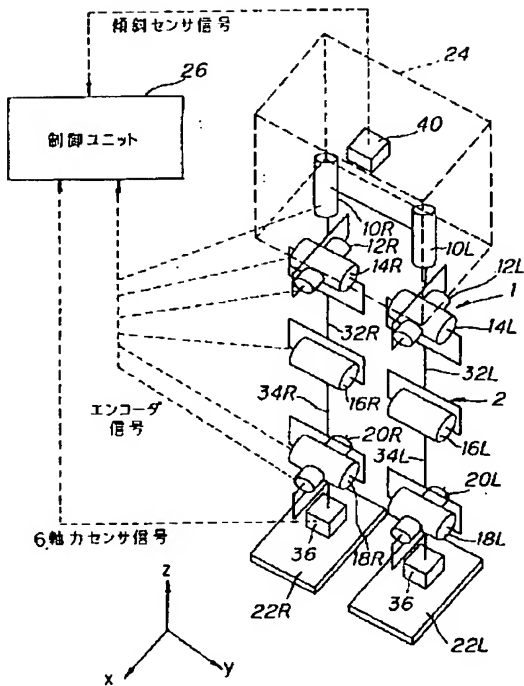
【図27】図25のブロック線図をフィルタの伝達特性を1にして変形した例を示すブロック線図である。

【図28】図27を機械的構成に置き換えて示す説明図である。

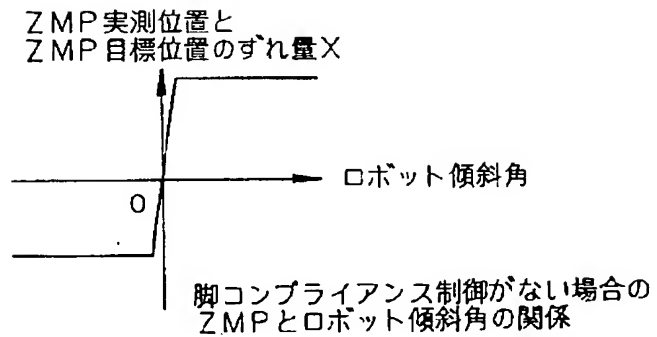
【符号の説明】

1	脚式移動ロボット（2足歩行ロボット）
2	脚部リンク
10R, 10L	脚部回旋用の関節
12R, 12L	股部のロール方向の関節
14R, 14L	股部のピッチ方向の関節
16R, 16L	膝部のピッチ方向の関節
18R, 18L	足首部のピッチ方向の関節
20R, 20L	足首部のロール方向の関節
22R, 22L	足平
24	上体
26	制御ユニット
36	6軸力センサ
80, 800	フィルタ

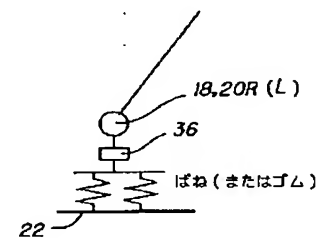
【図1】



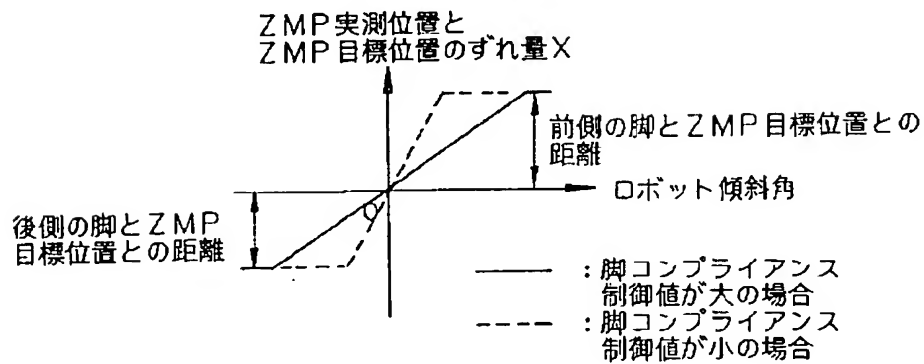
【図7】



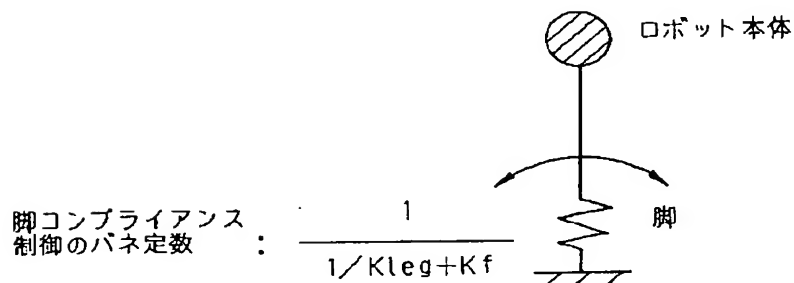
【図9】



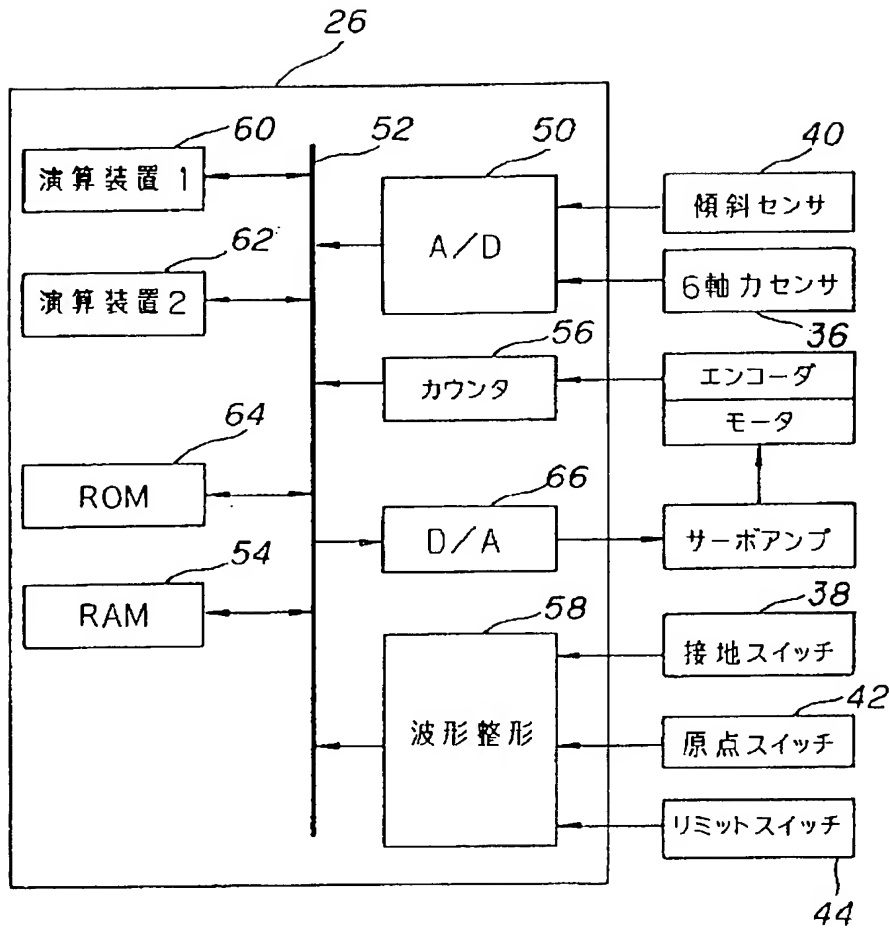
【図8】



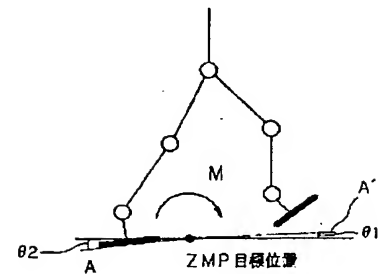
【図15】



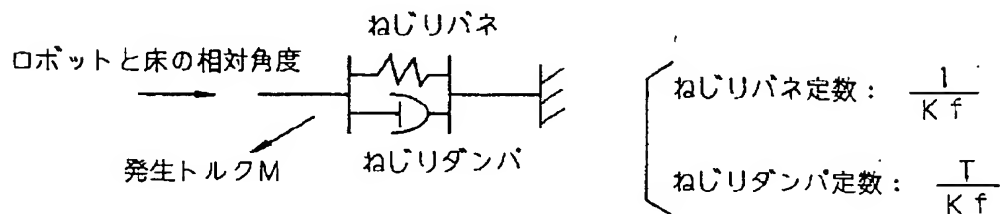
【図2】



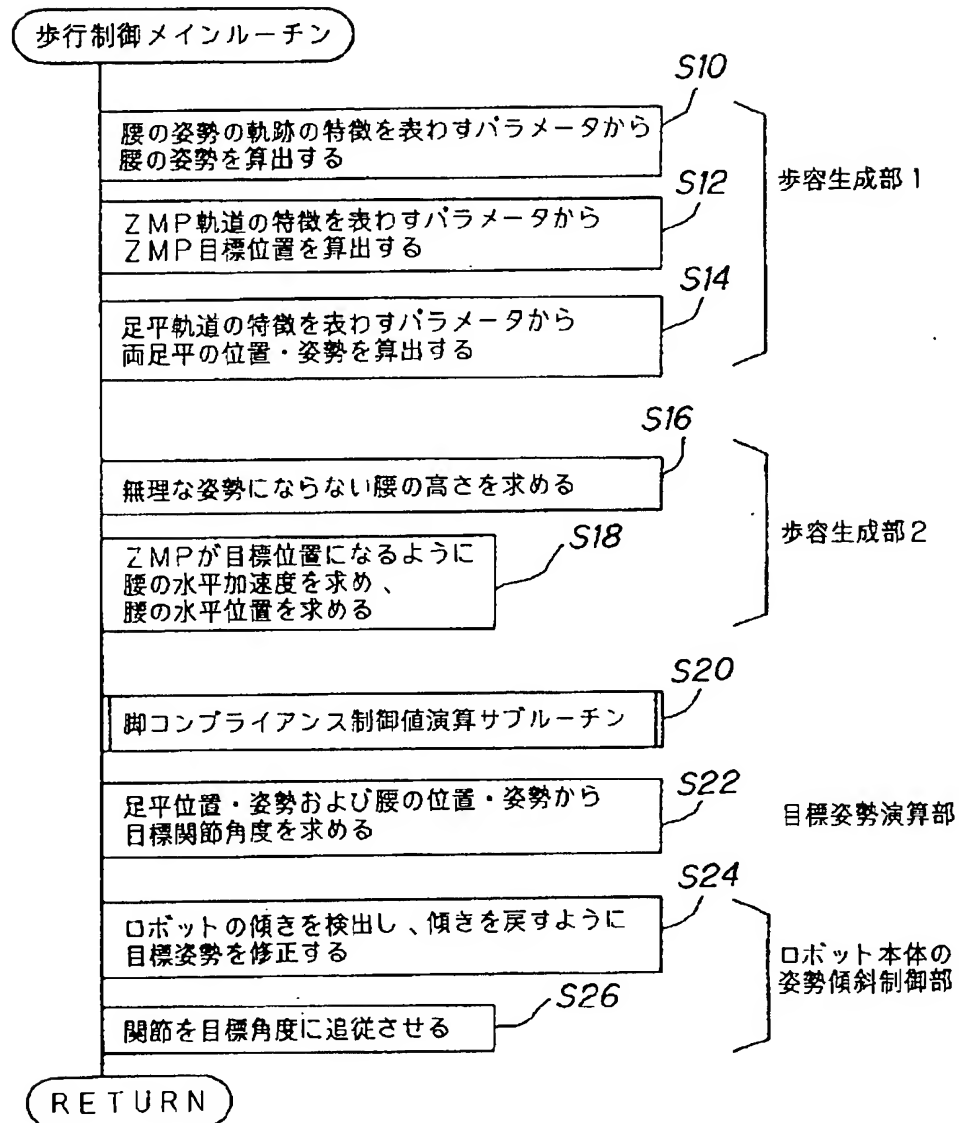
【図18】



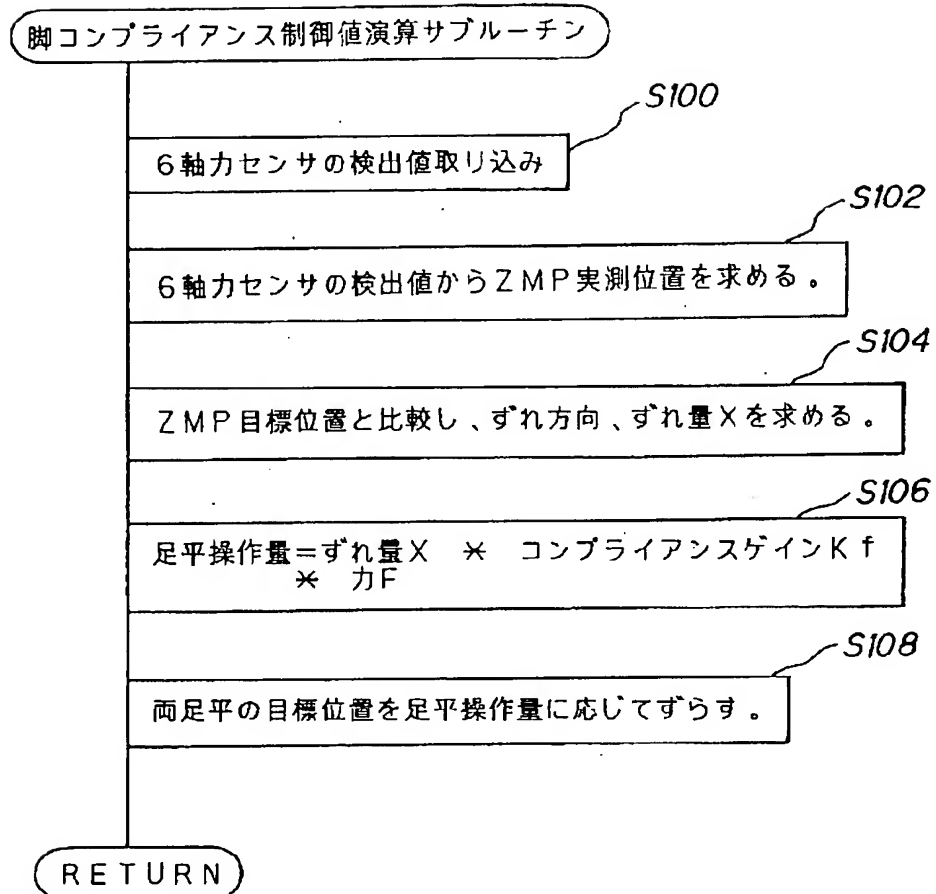
【図21】



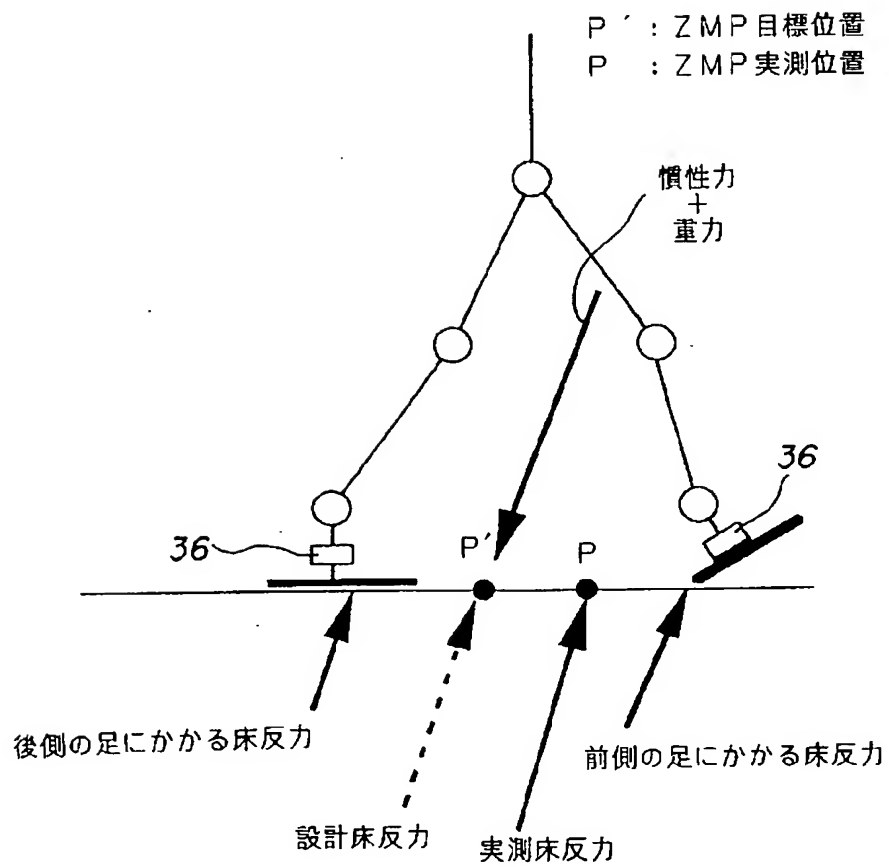
【図3】



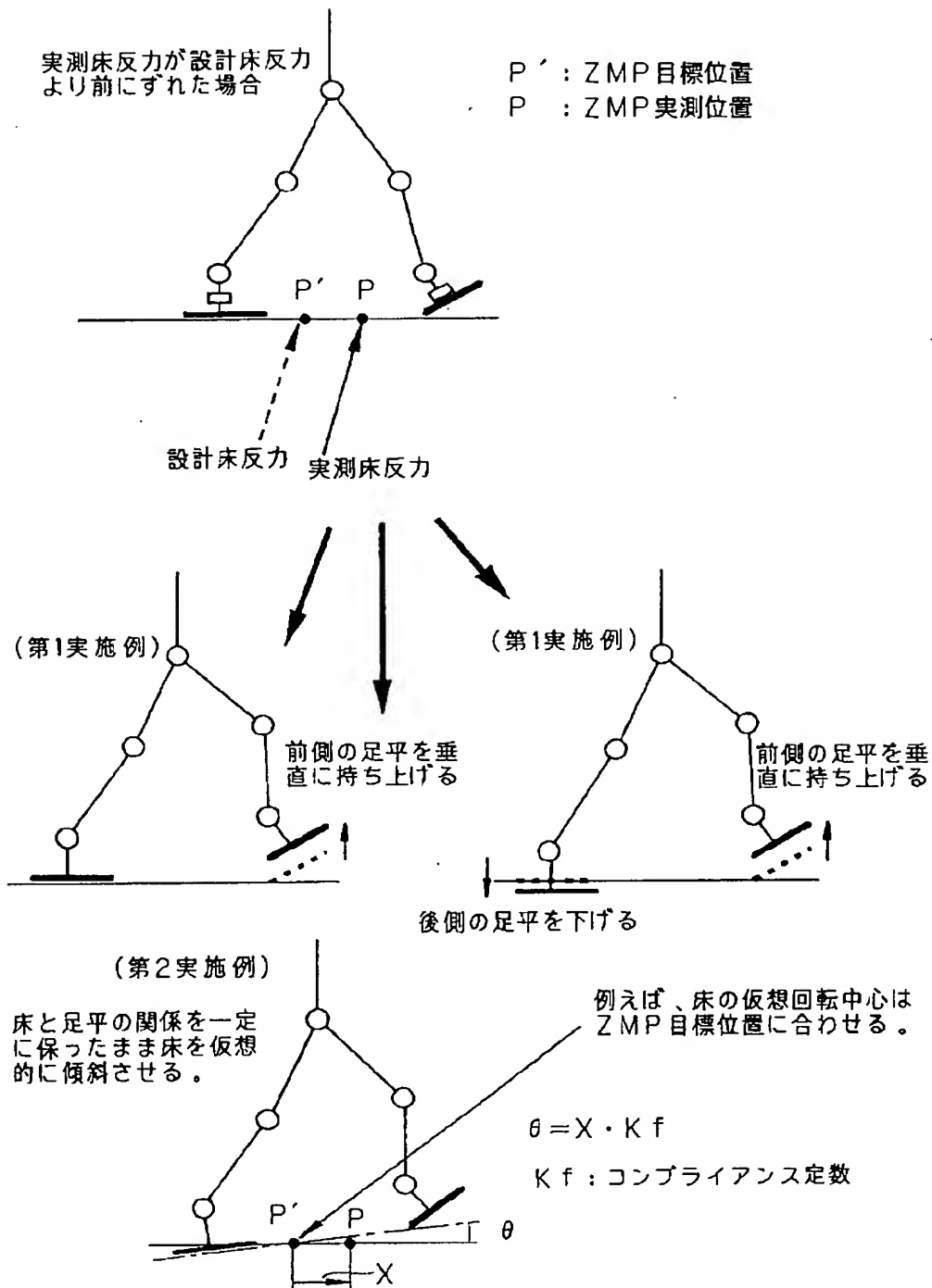
【図4】



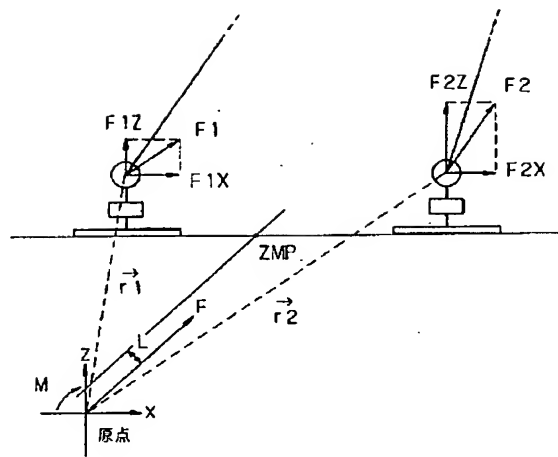
【図5】



【図6】



【図10】



原点まわりのモーメントMを求める

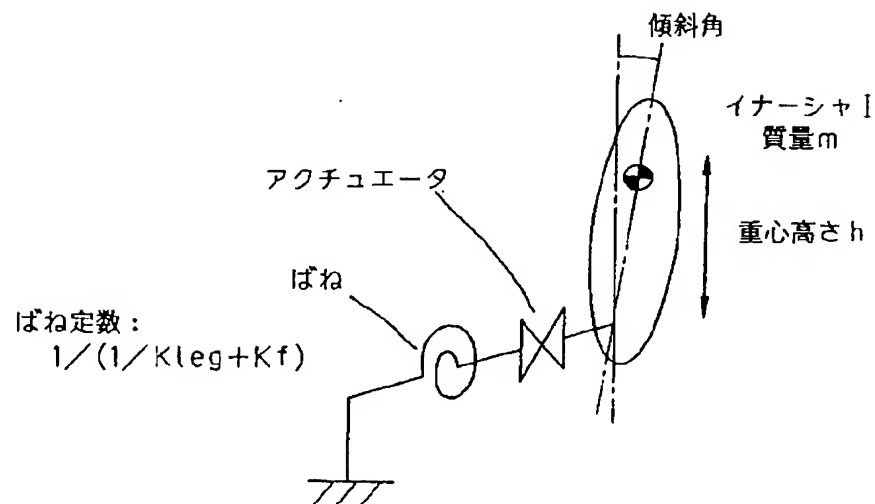
$$\vec{M} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2$$

(ただし、 \times :外積)

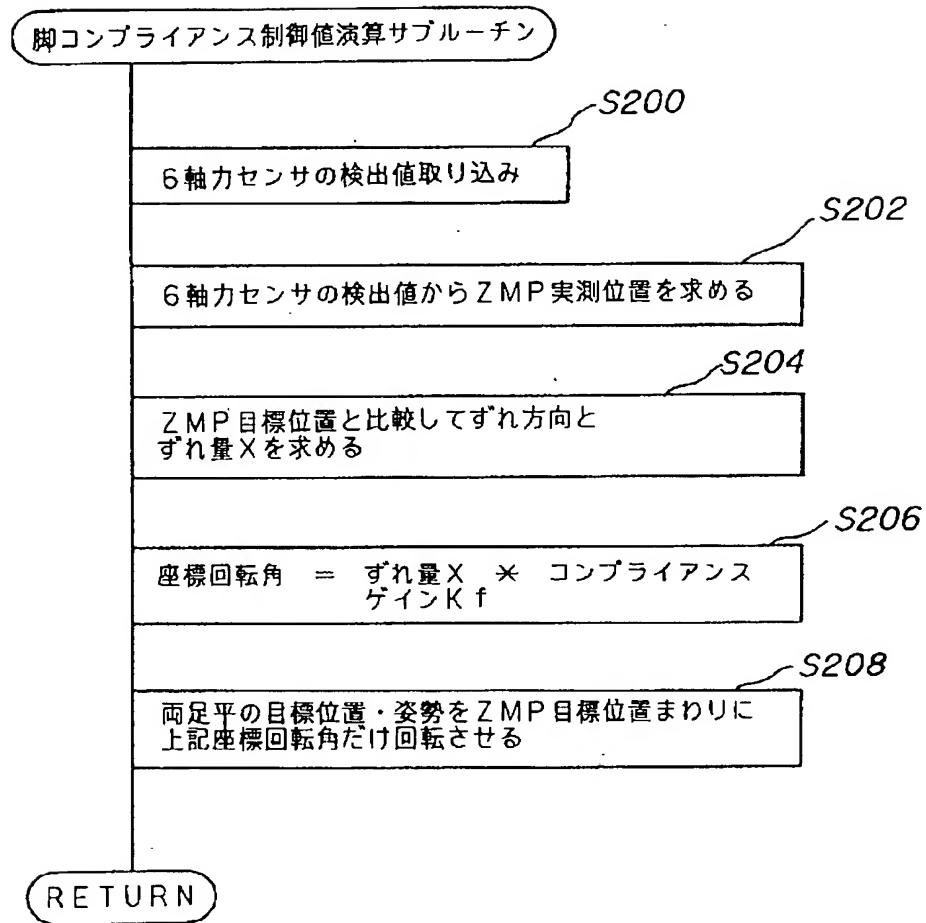
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$\vec{M} = \vec{L} \times \vec{F} \text{ となる } L \text{ を求める}$$

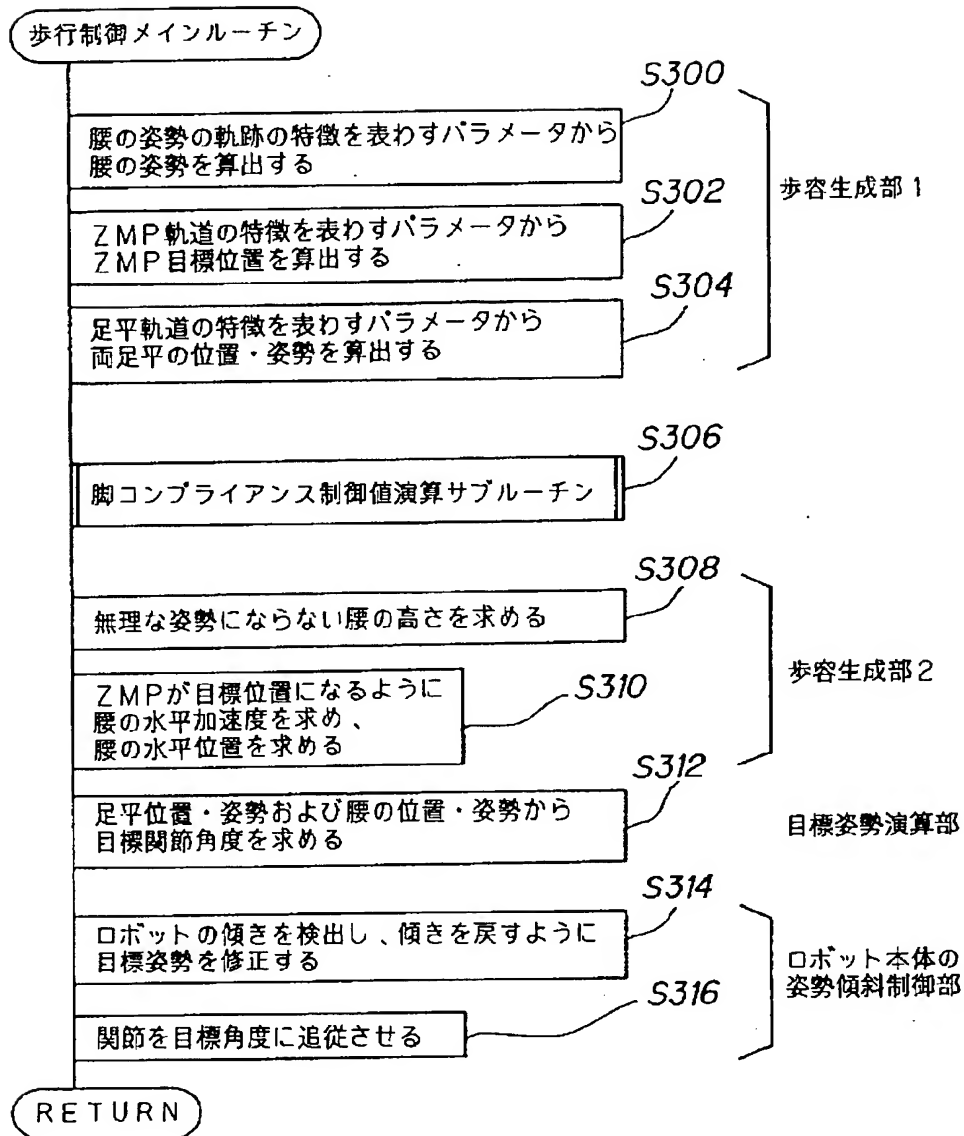
【図28】



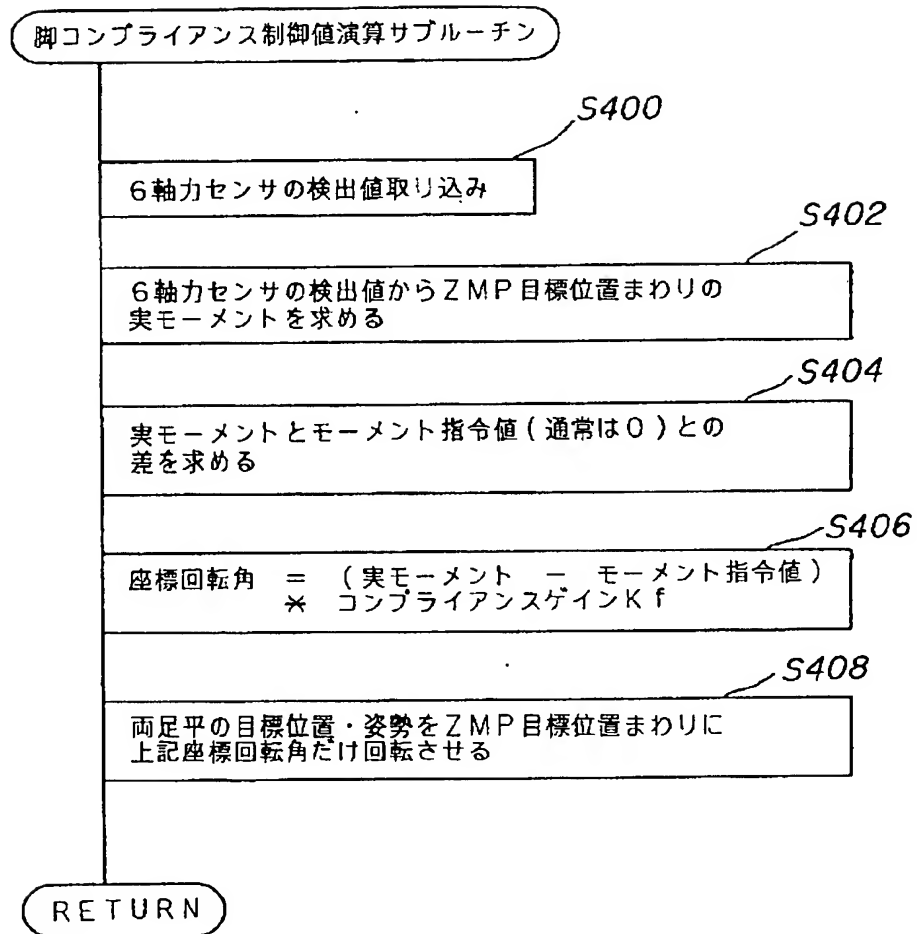
【図11】



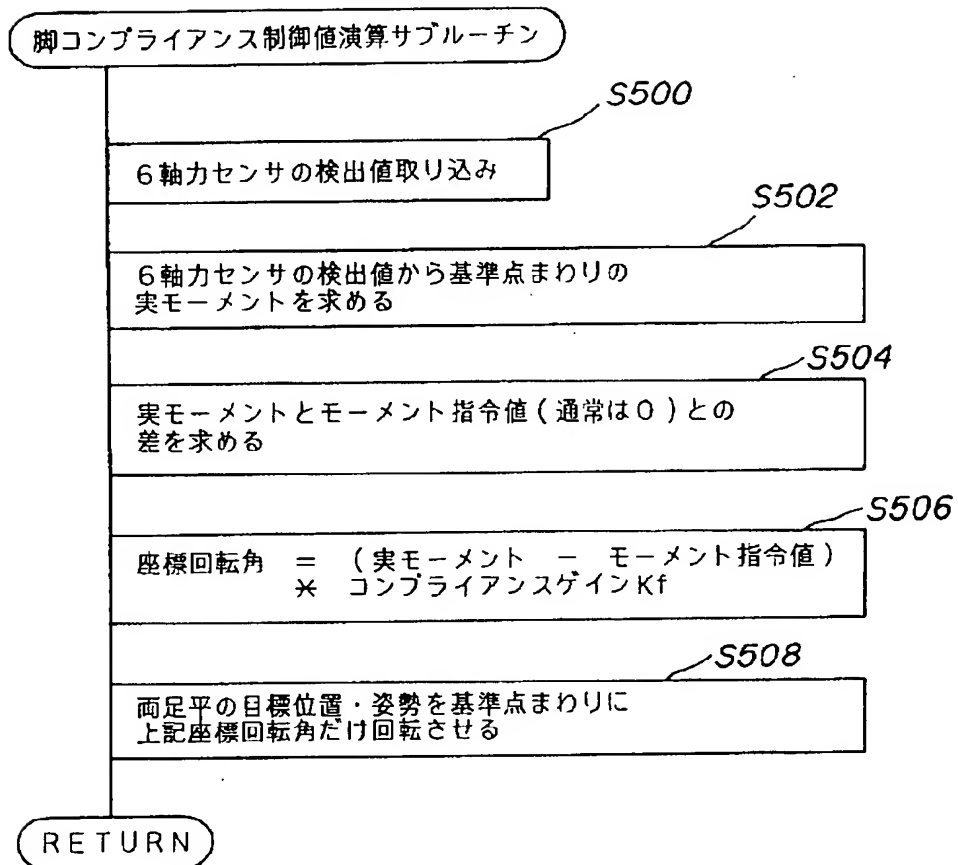
【図12】



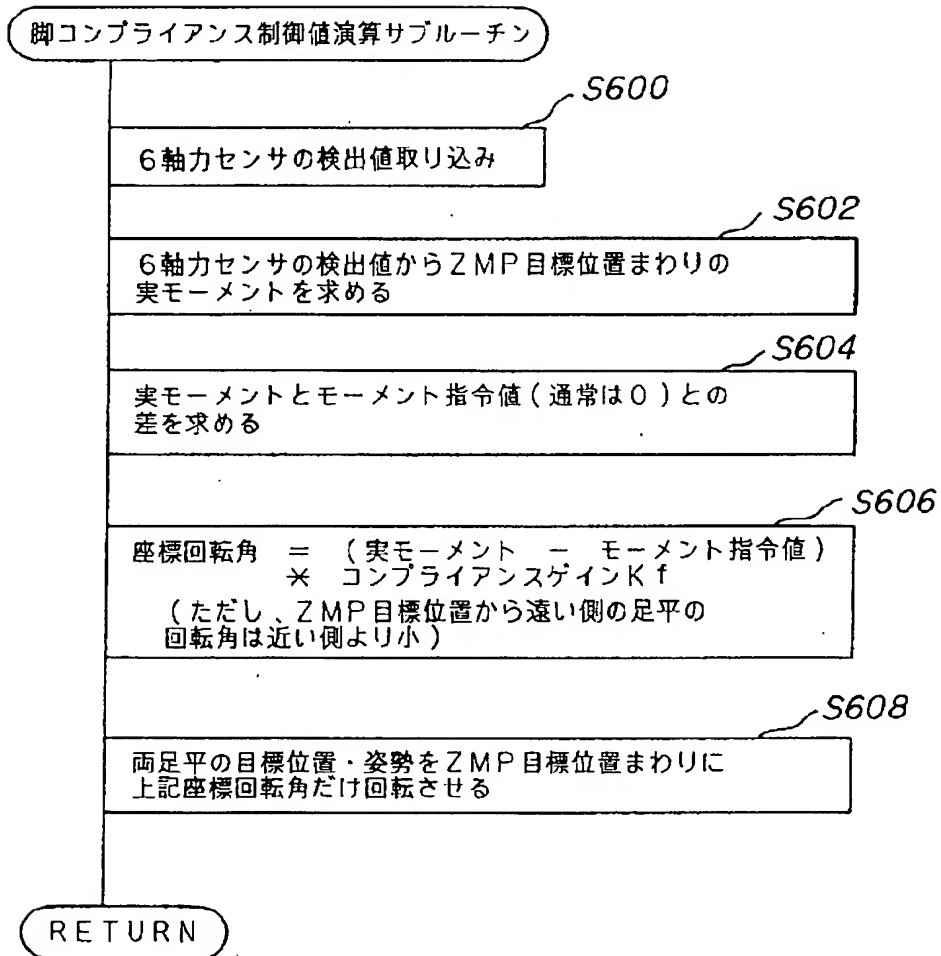
【図13】



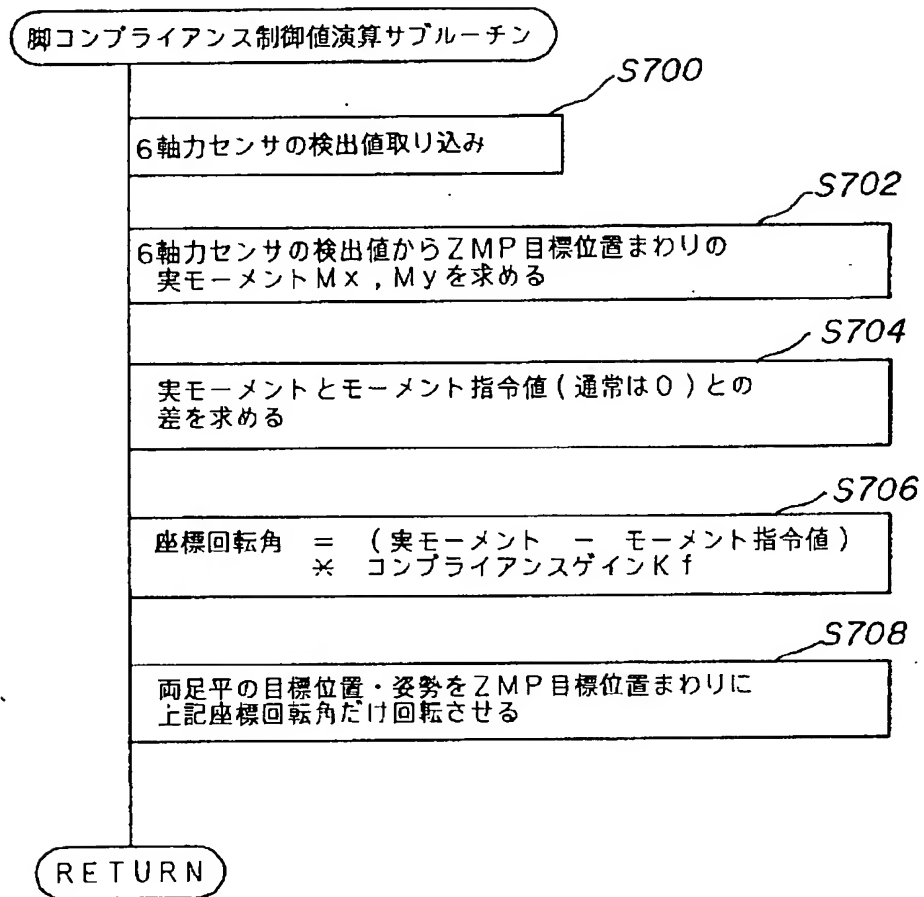
【図16】



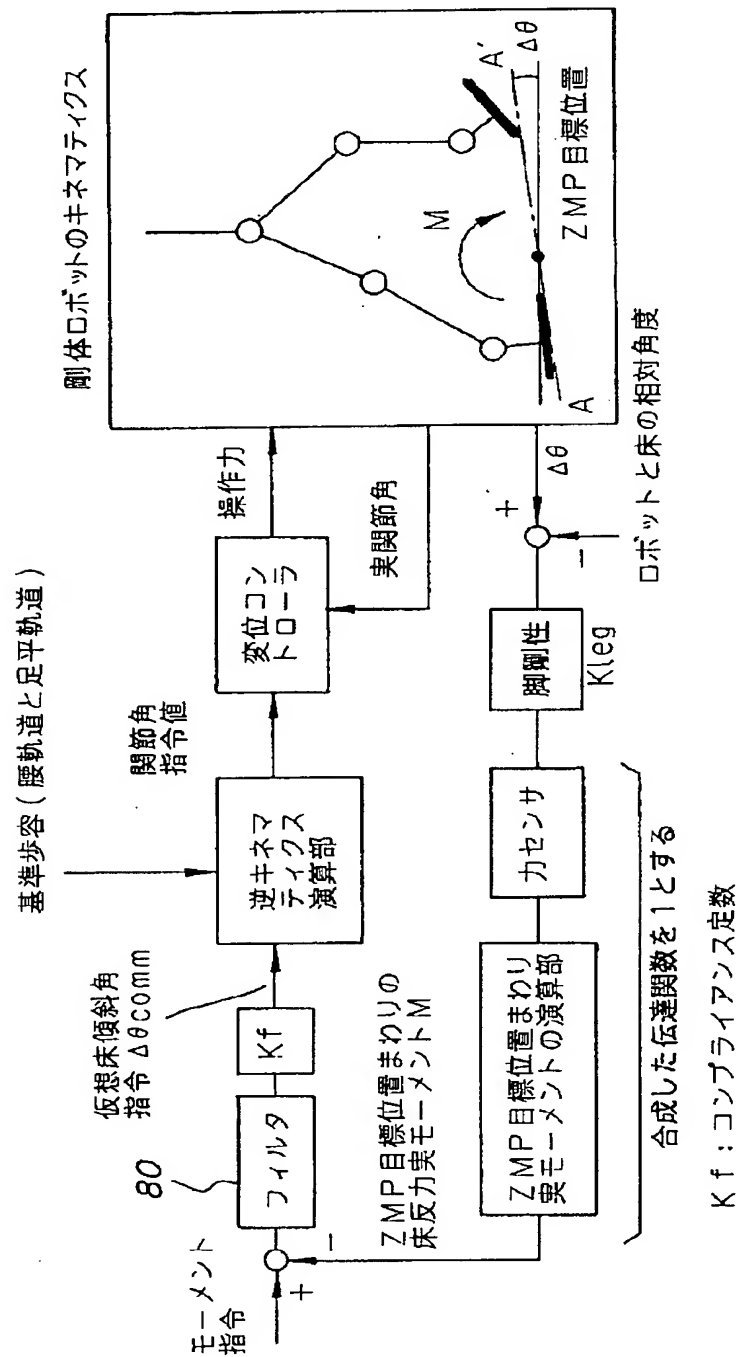
【図17】



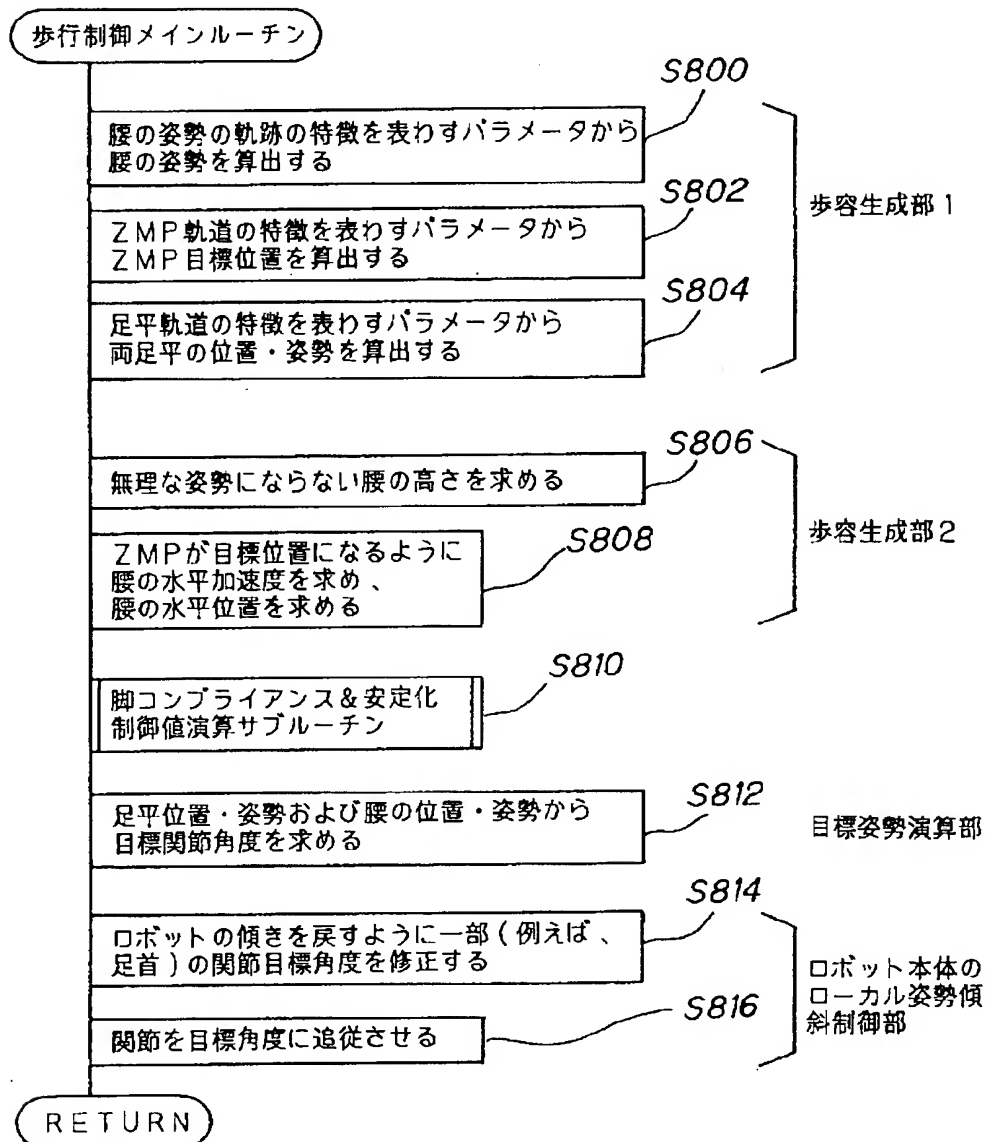
【図19】



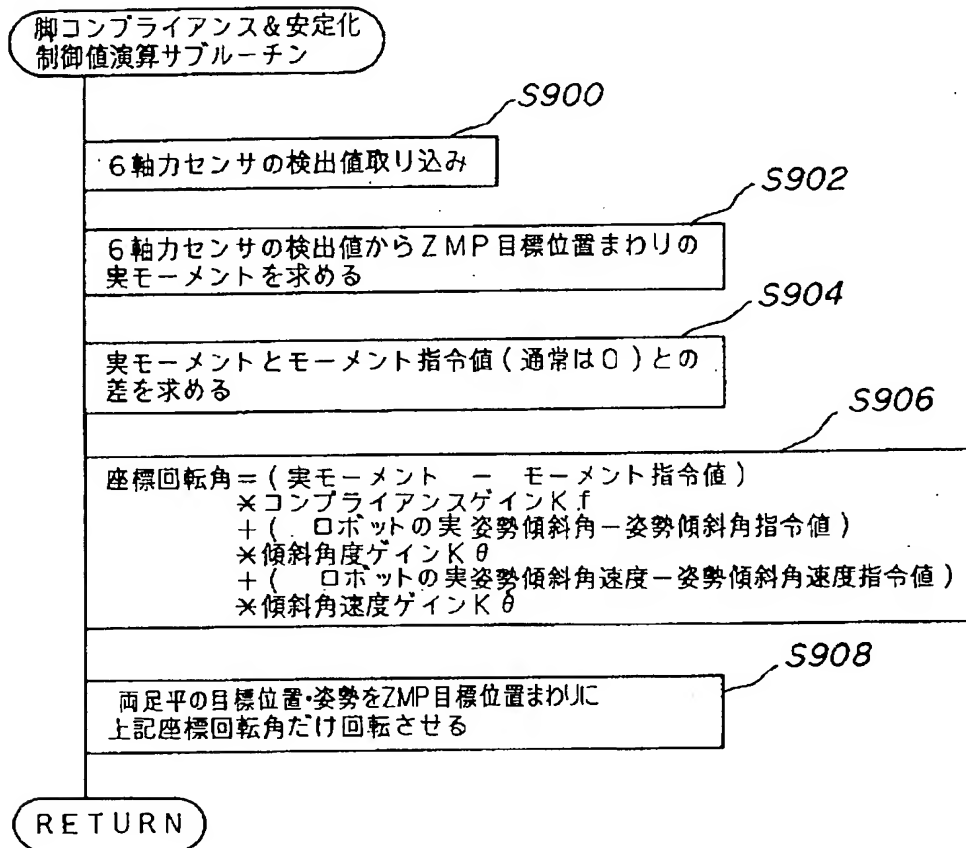
【図20】



【図22】



【図23】



ロボット機構特性

基準歩容（腰軌道と足平軌道）

剛体ロボットのキネマティクス

関節変位指令

操作力

変位コントローラ

実関節角

脚剛性 K_{leg}

床傾斜角 $\Delta\theta$

ZMP目標位置まわりの床反力実モーメント M

mgh

$\frac{1}{IS^2}$

姿勢傾斜

コンプライアンス制御部

逆キネマティクス演算部

仮想床傾斜角指令 $\Delta\theta_{comm}$

ZMP目標位置まわりの床反力推定モーメント

ZMP目標位置まわり実モーメントの演算部

力センサ

合成した伝達関数をとする

800

フィルタ

Kf

姿勢傾斜安定化制御則（PD等）

姿勢傾斜推定角

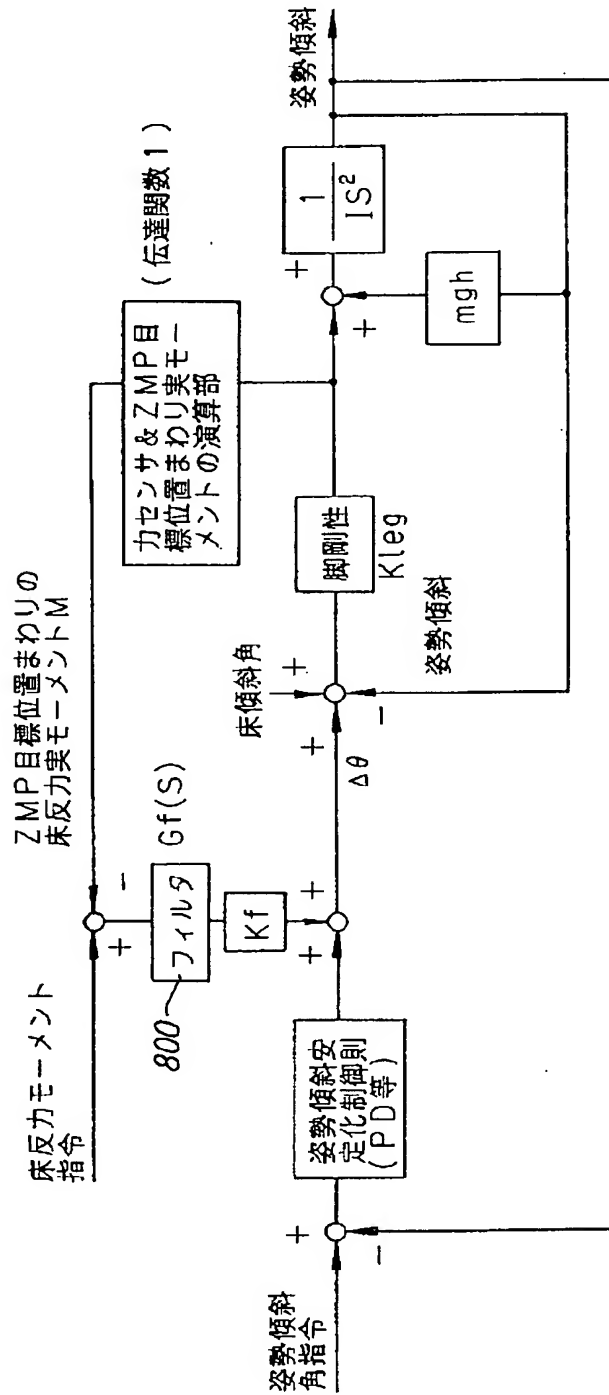
姿勢傾斜センサ

床反力モーメント指令

図6-17 ロボット歩行制御系ブロック図

K f : コンプライアンス定数
m h : ロボット質量
I : 重心高さ
g : ZMP目標位置まわりのロボットイナーシャ
S : 重力加速度

【図25】



【図26】

